



Расчет объема усадочных дефектов при охлаждении отливок в формах из неметаллических материалов

Разработана методика расчета коэффициентов объемной усадки металлов и литейных сплавов при их затвердевании и охлаждении. Установлены зависимости долевого распределения объемной усадки между усадочной раковинной и усадочной пористостью от величины интервала кристаллизации сплавов. Проведено уточнение формулы для расчета относительной объемной усадки металлов и сплавов при изготовлении из них отливок и слитков, охлаждающихся в формах из неметаллических материалов. Табл. 2. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: отливка, слиток, усадка, раковина, металл, сплав, затвердевание, охлаждение

Methodology for calculation of volumetric shrinkage coefficient for metals and casting alloys during their solidification and cooling is developed. Dependences of shared distribution of volumetric shrinkage between sink hole and shrinkage porosity on the value of crystallization interval of alloys are determined.

Specification of the formula for calculation of relative volumetric shrinkage of metals and alloys during production from them castings and ingots, which are being cooled in the moulds of non-metallic materials, is fulfilled.

Keywords: casting, ingot, shrinkage, hole, metal, alloy, solidification, cooling

Постановка проблемы и состояние вопроса

Объемная усадка – явление уменьшения объема тела при понижении его температуры. Согласно классификации предложенной А. А. Бочваром, полная объемная усадка каждого конкретного литого материала является величиной постоянной и включает объемы пустот, сосредоточенные в виде усадочной раковины и усадочной пористости. При этом, чем больше величина температурного интервала кристаллизации литого материала, тем большая доля объемной усадки реализуется в виде усадочных пор в отливке и, соответственно, меньшая доля – в виде усадочной раковины. В литых заготовках из сплавов, кристаллизующихся при постоянной температуре (чистые металлы, сплавы эвтектического состава), усадочная пористость практически не образуется.

Величину объемной усадки характеризуют коэффициентом β , который рассчитывают по формуле

$$\beta = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \approx 3 \cdot \left(1 - \frac{l_1}{l_2}\right) \approx 3 \cdot k \cdot (t_{\text{ЗАЛ}} - t_{20}) \approx 3\alpha, \quad (1)$$

где V_1, V_2 – объем тела до и после его охлаждения соответственно; ρ_1, ρ_2 – удельная плотность тела до и после его охлаждения соответственно; l_1, l_2 – длина отливки и длина рабочей полости формы по ее i -тому размеру соответственно; k – коэффициент термического линейного расширения материала отливки в интервале температур от

температуры расплава в форме в момент окончания ее заливки ($t_{\text{ЗАЛ}}$) до $t_{20} = 20^\circ\text{C}$; α – средневзвешенный коэффициент линейного расширения материала (при его нагреве от температуры $t_{\text{ОС}}$ до температуры $t_{\text{КР}}$, если $t_{\text{КР}} = t_{\text{ЗАЛ}}$), %.

Применительно к отливкам и слиткам наибольший практический интерес представляет величина коэффициентов объемной усадки при охлаждении и кристаллизации их материала, используемая в расчетах величины усадочной раковины в прибылях отливок и слитков. По предложению Ю. А. Нехендзи и Н. Г. Гиршовича, коэффициент объемной усадки залитого в форму материала можно рассчитать по формуле [1], %:

$$\beta_y = \beta_{\text{Ж}} + \beta_{\text{ЖТ}} + \beta_{\text{Т}}, \quad (2)$$

где $\beta_{\text{Ж}}$ – коэффициент объемной усадки материала при его охлаждении в жидком состоянии от температуры $t_{\text{ЗАЛ}}$ до температуры кристаллизации ($t_{\text{КР}}$), %; $\beta_{\text{ЖТ}}$ – коэффициент объемной усадки материала при его переходе из жидкого в твердое состояние при температуре $t_{\text{КР}}$, %; $\beta_{\text{Т}}$ – коэффициент объемной усадки материала в твердом состоянии при охлаждении от температуры $t_{\text{КР}}$ до температуры воздуха окружающей среды ($t_{\text{ОС}} = 20^\circ\text{C}$), %.

Формула (2) описывает частный случай условий питания и пригодна для расчетов отливок и слитков, заполнение форм которых проводят через прибыли открытого типа. То есть, величина β_y , рассчитанная по формуле (2), для большинства литых заготовок не учитывает долю объемной усадки, компенсированную за счет их питания через питатели (литниковые ходы) и не позволяет проводить оценку усадочной пористости в отливке и усадочной раковины в ее прибылях.

Постановка задачи исследования

Задача исследований – разработка методики расчета коэффициентов объемной усадки для литых изделий из металлов и сплавов, изготавливаемых в формах из неметаллических материалов, для оценки величины усадочной пористости отливок и объема усадочной раковины в их прибылях.

Основные результаты исследований

Анализ формулы (2) и условий питания реальных отливок показывает, что общей формулой рассматриваемого процесса является выражение

$$\beta_y = \beta_{ж} + \beta_{жТ}^y + \beta_T - \beta_{пит}, \quad (3)$$

где $\beta_{жТ}^y$ – коэффициент объемной усадки расплава при его переходе из жидкого в твердое состояние, учитывающий долю объемной усадки, реализованной в виде усадочной раковины и усадочной пористости; $\beta_{пит}$ – коэффициент, учитывающий компенсацию объемной усадки материала за счет поступления расплава в затвердевающую отливку (слиток) через питатель (литниковый ход), %.

Расчет величины $\beta_{ж}$

Если расплав металла залит в форму с температурой $t_{зал}$, величину $\beta_{ж}$ рассчитывают по формуле, %:

$$\beta_{ж} = 100 \cdot \frac{\rho_{жТ} - \rho_{ж}^t}{\rho_{ж}^t}, \quad (4)$$

где $\rho_{жТ}$ – плотность жидком состоянии при температуре $t_{зал}$, кг/м³, для чистых металлов:

$$\rho_{ж}^t = \rho_{жТ} - J \cdot (t_{зал} - t_{пл}). \quad (5)$$

Значения плотности металлов и кремния в твердом состоянии при 20 °С (ρ_{20}), при температуре их плавления (равновесной кристаллизации) в твердом ($\rho_{Тж}$) и жидком ($\rho_{жТ}$) состоянии, а также значения коэффициента J в формулах (4) и (5), принятые для расчетов, приведены в табл. 1.

Поскольку плотность жидкого сплава – параметр, который может быть рассчитан по правилу аддитивности, для сплава, состоящего из (n) компонентов (веществ), расплав которого нагрет до температуры $t_{зал}$, величину $\beta_{ож}$ рассчитываем по формуле, %:

$$\beta_{ж}^{СП} = 100 \cdot \frac{\rho_{жТЛ}^{СП} - \rho_{жТ}^{СП}}{\rho_{жТ}^{СП}}, \quad (6)$$

$$\rho_{жТЛ}^{СП} = \sum_{i=2}^n m_i \cdot \rho_{жТЛ}, \quad (7)$$

$$\rho_{жТ} = \sum_{i=2}^n m_i \cdot [\rho_{жТЛ} - J_i \cdot (t_{зал} - t_L)], \quad (8)$$

где m_i – массовая доля i-того компонента в сплаве; $\rho_{жТЛ}$ – плотность жидкого i-того компонента в сплаве при температуре ликвидус сплава, кг/м³.

Расчет величины $\beta_{жТ}^y$

Величину $\beta_{жТ}^y$ для чистых металлов и эвтектических сплавов рассчитываем по формуле

$$\beta_{жТ}^y = \beta_{жТ} = 100 \cdot \frac{\Delta H_{пл}}{\Delta H_{кип}}, \quad (9)$$

где $\Delta H_{пл}$, $\Delta H_{кип}$ – теплота плавления (кристаллизации) и кипения (испарения) металла соответственно. Для сплавов, кристаллизующихся в интервале температур:

$$\beta_{жТ}^y = f \cdot \beta_{жТ}^{СП}, \quad (10)$$

$$\beta_{жТ}^{СП} = 100 \cdot z \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{\Delta H_{пл_i}}{\Delta H_{кип_i}}, \quad (11)$$

где f – доля объемной усадки литейного материала, реализованная в виде усадочной раковины; z – безразмерный поправочный коэффициент; $\Delta H_{пл_i}$, $\Delta H_{кип_i}$ – теплота плавления (кристаллизации) и кипения (испарения) i-того компонента в сплаве соответственно; m_i – массовая доля i-того компонента в сплаве.

Зависимость величины f от температурного интервала затвердевания (Δt) металлов и сплавов

Таблица 1. Плотность металлов и кремния в твердом (ρ_{20} , $\rho_{Тж}$) и жидком ($\rho_{жТ}$) состоянии, значения коэффициента J

Металл	Fe	Ni	Co	Cr	Mn	Mo	W	Ti	Cu	Sn	Zn	Pb	Au	Ag	Mg	Al	Si
ρ_{20} , кг/м ³	7874	8902	8790	7194	7210	10200	19250	4540	8929	7310	7133	11341	19320	10500	1738	2699	2330
$\rho_{Тж}$, кг/м ³	7265	8141	8080	6676	6366	9390	17510*	4252	8500	7144	6951	10982	18270	9705	1666	2535	2300
$\rho_{жТ}$, кг/м ³	7035	7790	7750	6307	6080	8900	16740	4120	8030	6970	6570	10680	17350	9350	1584	2380	2530
J, кг/(м ³ ·град)	0,730	1,159	0,988	0,723	0,930	0,71*	0,54*	0,226	0,944	0,637	0,950	1,173	1,000	0,907	0,265	0,270	0,150

не склонных к образованию газоусадочной пористости при плавке и заливке в форму на открытом воздухе, а также после проведения мероприятий по их дегазации, рассчитываем по формуле

$$f = \frac{1}{\exp(0,01 \cdot \Delta t)^2}, \quad (12)$$

где Δt – температурный интервал кристаллизации, °С.

Для сплавов склонных к образованию газоусадочной пористости, например, алюминиевых сплавов, коэффициент f рассчитываем по формуле

$$f = \frac{0,95}{\exp(0,05 \cdot \Delta t)^2}. \quad (13)$$

Ожидаемую величину усадочной пористости отливки (слитка) при ее (его) затвердевании в нормальных условиях рассчитываем по формуле, %:

$$\Pi = (1 - f) \cdot \beta_{ЖТ}^{СП} \quad (14)$$

Формула (10) применима для расчета $\beta_{ЖТ}^Y$ значительного числа известных сплавов за исключением тех, у которых переход из жидкого в твердое состояние сопровождается увеличением объема. К числу таких сплавов, в частности, относятся серые чугуны с определенной величиной углеродного эквивалента (C_3), для которых

$$\beta_{ЖТ}^Y = \beta_{ЖТ}^{СП} = 10,2 - 2,75 \cdot C_3, \quad (15)$$

$$C_3 = [C] + 0,3 \cdot [Si] + 0,33 \cdot [P] + 0,4 \cdot [S] - 0,03 \cdot [Mn],$$

где C_3 – углеродный эквивалент чугуна; [C], [Si], [P], [S], [Mn] – содержание химических элементов в сером чугуне соответственно, % (по массе).

В соответствии с (15), при определенном содержании химических элементов (при $C_3 = 3,71$ %) величина $\beta_{ЖТ}^Y$ может принимать нулевое или отрицательные значения.

Из этого следует, что для тонкостенных отливок из серых чугунов не всегда есть необходимость использования прибылей. Данная закономерность объясняется увеличением объема затвердевающего серого чугуна при выделении и в его структуре в области

температуры солидус свободного графита, который частично или полностью компенсирует объемную усадку охлаждающегося и кристаллизующегося расплава.

На объем усадки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) наиболее заметное влияние оказывает количество введенного в расплав магния. Как правило, количество Mg, вводимого в расплав ВЧШГ, составляет 0,04-0,08 % от массы модифицируемого чугуна. Для этих случаев, по результатам обработки данных [2], получили следующую формулу для расчета величины $\beta_{ЖТ}^Y$ ВЧШГ, %:

$$\beta_{ЖТ}^Y = \frac{C_3}{4,25} \cdot (4 + 47,8 \cdot [Mg] + 1705,7 \cdot [Mg]^2 - 15924 \cdot [Mg]^3), \quad (16)$$

где [Mg] – количество введенного в чугун магния, % (по массе).

Расчет величины β_T

По предложению Ю. А. Нехендзи и Н. Г. Гиршовича, коэффициент объемной усадки в твердом состоянии можно рассчитать по формуле, %:

$$\beta_T = A \cdot \alpha \quad (17)$$

где A – коэффициент ($A = 1,5$); α – средневзвешенный коэффициент линейного расширения материала в твердом состоянии при нагреве от температуры t_{OC} до температуры $t_{КР}$, %.

Значения коэффициента α для литейных сплавов приведены в табл. 2.

Расчет величины $\beta_{ПИТ}$

Расчет величины $\beta_{ПИТ}$ можно, например, проводить по формулам работы [3], в которой для расчета размеров прибылей используют компенсационный метод. Например, предположим, что необходимо рассчитать относительный объем усадочной раковины в слитке из стали 30Л, залитой в форму из неметаллического материала с перегревом $\Delta t = 60$ °С через прибыльную надставку, оценить ожидаемую величину усадочной пористости слитка и общую величину объемной усадки, реализованной в виде усадочных дефектов. Химический состав стали: C = 0,3 %, Mn = 0,7 %, Si = 0,4 %, Fe = 98,5 %; температурный интервал кристаллизации стали $t_{LS} = 59$ °С.

Таблица 2. Значения коэффициента для литейных сплавов

Сплав, марка	a	Сплав, марка	a
Чугун: ВЧШГ	1,4	Латунь	1,7
	1,0	Алюминиевые сплавы: АЛ2, АЛ4	1,0
серый	2,0		АЛ5, АЛ6, АЛ9, АЛ13
		белый	
Сталь: 20Л-55Л, низколегированная	2,1	АЛ3, АЛ10, АЛ11, АЛ12	1,3
	1,9		1,4
с 8-15 % Cr	1,7	АЛ1, АЛ7, АЛ8	1,8
			1,5
с 20-35 % Cr	2,2	Магниеые сплавы: МЛ1, МЛ2	1,5
	хромоникелевая типа 18/8, 24/18*		2,5
высокомарганцовистая, никелевая			
Бронза: оловянная	1,5	Никелевые, кобальтовые сплавы	2,5
	1,7		2,0
кремниевая, алюминевая	2,4	Титановые сплавы	1,0
		Цинковые сплавы	

Поскольку заливку расплава в форму проводят через ее прибыльную надставку величину $\beta_{\text{ПИТ}}$ в расчете не учитываем. По формуле (17) рассчитываем величину коэффициента β_T , приняв, по данным табл. 2 значение $\alpha = 2,1\%$: $\beta_T = 1,5 = 2,1 = 3,15\%$.

По формуле (12) рассчитываем величину коэффициента f :

$$f = \frac{1}{\exp(0,01 \cdot 59)^2} = 0,71$$

По формулам (6-11) рассчитываем величину при $z \beta_{\text{ЖТ}}^{\text{СП}}$ используя данные работы [4], а остальные значения определяем с учетом данных, приведенных в табл. 1:

$$\beta_{\text{ЖТ}}^{\text{СП}} = 100 \cdot z \cdot \left(m_{\text{Fe}} \cdot \frac{\Delta H_{\text{ПД}}^{\text{Fe}}}{\Delta H_{\text{КШП}}^{\text{Fe}}} + m_{\text{Mn}} \cdot \frac{\Delta H_{\text{ПД}}^{\text{Mn}}}{\Delta H_{\text{КШП}}^{\text{Mn}}} + m_{\text{Si}} \cdot \frac{\Delta H_{\text{ПД}}^{\text{Si}}}{\Delta H_{\text{КШП}}^{\text{Si}}} \right) =$$

$$= 100 \cdot 1 \cdot \left(0,985 \cdot \frac{15470}{392900} + 0,007 \cdot \frac{13400}{283000} + 0,004 \cdot \frac{50400}{315000} \right) = 3,98\%$$

$$\beta_{\text{ЖТ}}^{\text{V}} = 0,71 \cdot 3,98 = 2,826\%$$

$$\rho_{\text{ЖЛ}}^{\text{СП}} = 0,985 \cdot 7035 + 0,007 \cdot 6366 + 0,004 \cdot 2530 = 6986,6 \text{ кг/м}^3$$

$$\beta_{\text{Ж}}^{\text{СП}} = 100 \cdot \frac{6986,6 - 6940,6}{6940,6} = 0,663\%$$

$$\rho_{\text{ЖТ}} = 0,985 \cdot (7035 - 0,73 \cdot 60) + 0,007 \cdot (6366 - 0,93 \cdot 60) +$$

$$0,004 \cdot (2530 - 0,15 \cdot 60) = 6940,6 \text{ кг/м}^3$$

По формуле (3) рассчитываем общий относительный объем усадочных полостей в слитке:

$$\beta_{\text{У}} = 0,663 + 2,826 + 3,15 = 6,639\%$$

Объем усадочной пористости (Π , %) и усадочной раковины (β , %) в слитке по расчету составит:

$$\Pi = (1-f) \cdot \beta_{\text{ЖТ}}^{\text{СП}} = (1 - 0,71) \cdot 6,639 = 1,925\%$$

$$\beta = \beta_{\text{У}} + \Pi = 6,639 - 1,925 = 4,714\%$$

Выводы

Разработана методика расчета коэффициентов объемной усадки металлов и литейных сплавов при их затвердевании и охлаждении. Получены зависимости долевого распределения объемной усадки между усадочной раковиной и усадочной пористостью от величины интервала кристаллизации сплавов. Проведено уточнение формулы по расчету относительной объемной усадки металлов и сплавов при изготовлении из них отливок и слитков, охлаждающихся в формах из неметаллических материалов.

Библиографический список

1. Нехендзи Ю. А. Стальное литье / Ю. А. Нехендзи. – М.: Металлургия, 1948. – 525 с.
2. Жевтунов П. П. Литейные сплавы / П. П. Жевтунов. Под ред. Н. Н. Рубцова – М.: Машгиз, 1957. – 432 с.
3. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях – Днепрпетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
4. Цибрик А. Н. Физико-химические постоянные материалов и параметры процессов литья. Справочник / А. Н. Цибрик, Л. А. Семенюк, В. А. Цибрик – К.: Наукова думка. – 1987. – 270 с.

Поступила 12.06.2014

Metallurgical and Mining Industry

www.metaljournal.com.ua